

テラヘルツ位相シフト干渉計による 3 次元イメージング

佐々木芳彰¹, 須賀真之², 春日 博³, 湯浅哲也², 大森 整³, 大谷知行¹

¹理研・テラヘルツイメージング研究チーム, ²山形大 応用生命システム工学科, ³理研・大森素形材工学研究室

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 波は, 電波と赤外線の間位置する電磁波でさまざまな物質を透過することが知られている. さらに, 波長が数百 $\cdot\mu\text{m}$ 程度と短く, 多くのイメージング用途にとって十分な空間分解能を得ることができるため, イメージング技術が非常に注目され国内外で研究開発が行われている. 一方, 従来のテラヘルツイメージングは, 主としてパルス光源が用いられ, 直接検波, 反射成分検出, 特徴的な吸収スペクトル(指紋スペクトル)を用いる手法など種々の報告がなされているが, 厚みのある被写体の透過性が悪いため, その多くは厚みの薄い被写体を透過, 反射してきた強度による 2 次元イメージングである. このようなイメージングでは位相情報が失われ, 被写体によって吸収された強度コントラストのみを示すことになるため, 被写体の厚みが増すほど微弱な透過強度の検出が困難になる.

そこで, 強度によらない位相情報を用いる手法として, テラヘルツ波の連続波 (CW) 光源と干渉計を用いて, 位相シフト干渉法を適用して, 高感度かつ高い空間分解能を有する反射型 3 次元テラヘルツイメージングの有効性を確認するため原理検証を試みた. 本報告ではその成果を紹介する.

2. 原理および実験装置

位相シフト干渉法は, レーザ光および X 線領域ではイメージングの手法として利用されているが, テラヘルツ領域での報告例はほとんどない. 位相シフト干渉法は, 干渉計の参照光と信号光の間に任意の位相差を与えた時の干渉強度の変化を測定することにより, 参照光と信号光の位相差を算出する. これらのイメージング像から算出された位相差を高さの情報に変換することで, 高分解能イメージングを取得することができる. このように, 1 波長分の位相 (2π) より小さい分解能で干渉縞の位相を求めることで, 高さ方向の空間分解能が波長の $1/100$ 程度まで実現可能となる. 本手法では, 波長が λ の場合, 位相差が 2π (高さ方向が $\lambda/2$) を超えると $2\pi n$ の位相ジャンプを含む不連続なものとなるため位相接続の処理を行なう.

図 1 にマイケルソン干渉計を基にしたテラヘルツイメージングシステムを示す. 光源として半導体ダイオード通倍発信器 (CW, 周波数 625 GHz, Virginia Diode 社製) を用いた. 光源からのテラヘルツ光は干渉計内のビームスプリッタにより信号光と参照光に分けられる. 信号光はレンズで集光した後, 2 軸ステージ上に配置された試料に入射する. 参照光は参照ミラーの移動により位相を $0\sim 3\pi/2$ まで $\pi/2$ ステップで 4 回変化させる (4 ステップ法). 試料からの反射光は, 参照光と合波されダイオード検出器で受光される. 参照光の各ステップごとに試料のイメージング ($24 \times 24 \text{ mm}$, 0.2 mm/pixel) を行なう. ここで得られた 4 枚の干渉強度の画像から処理を行ない, 位相情報から高さ情報に変換した 3 次元イメージング像を得る.

3. 実験および結果

本実験では, 図 2(a) に示すような真鍮製 ($25 \times 25 \text{ mm}$) のサンプルを試作した. サンプルは図 2(b) に示すように半分は基準面, もう半分は基準面からそれぞれ 1, 2, 4, 10, 30 $\cdot\mu\text{m}$ (設計値) の深さに 5 mm 間隔で 5 層の階段状のザグリ面を設けた. まず始めに試作したサンプルのザグリ深さの精度を確認するため, レーザ光 3 次元形状測定装置 (三鷹光器, NH-3) により, 表面の形状測定を行なった結果を図 3(a) に示す (領域 $24 \times 24 \text{ mm}$, 0.2 mm/pixel). その結果, 試作したサンプルのザグリ深さが 1, 2, 4, 10, 30 $\cdot\mu\text{m}$ の位置における測定値はそれぞれ 2.28, 4.58, 6.86, 12.27, 31.11 $\cdot\mu\text{m}$, 基準面における高さ分解能は測定値とフィ

ツティングから $0.66 \cdot \mu\text{m}$ であることが分かった。

次に、本イメージングシステムが有する高さ方向の分解能を評価するため、サンプルのイメージングを行なった結果を図 3(b)および図 4 に示す。図 3(b)からサンプルの階段状の層が描出されていることが分かる。また、図 4 に示すように基準面に対してそれぞれのザグリ深さが識別可能である。これらの結果、1, 2, 4, 10, 30 $\cdot \mu\text{m}$ のザグリ深さに対する測定値の平均はそれぞれ 2.33, 4.90, 6.59, 10.65, 32.25 $\cdot \mu\text{m}$ 、基準面における高さ分解能は 1.09 $\cdot \mu\text{m}$ であった。図 3 および図 4 の結果から、本イメージングシステムの測定値はレーザ光の 3 次元形状測定装置の測定値とほぼ一致している。さらに、本実験からシステムの高さ分解能は 1.09 $\cdot \mu\text{m}$ であり、波長 (480 μm) の 1/440 におよぶ分解能を有していることが明らかになった。

4. まとめ

本報告では、テラヘルツ位相シフト干渉計による高分解能イメージングの可能性について原理検証を行なった。その結果、立体的な構造をもつ被写体に関して高さ情報を再現できることが明らかになった。さらに、高さ方向の分解能は 1.09 $\cdot \mu\text{m}$ であり波長の 1/440 程度有していることが明らかになった。今後は、光学系や画像処理方法の改良を加え、さらなる高分解能化を目指す。本手法では、テラヘルツ波の透過性を活かすことで、表面のみならず被写体内部の形状測定も可能になると期待される。

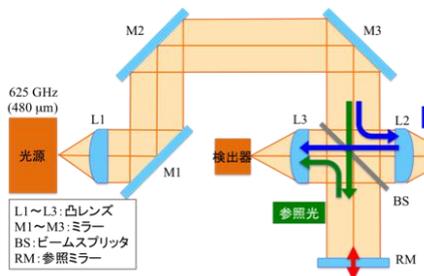


図1 イメージングシステム

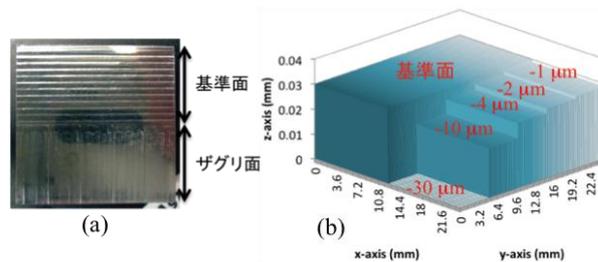


図2 (a) サンプルの写真と(b)立体図

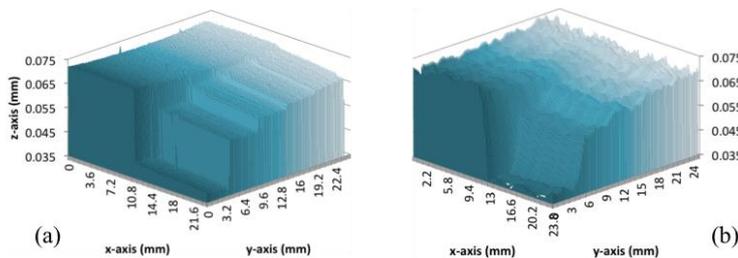


図3 (a)レーザ表面形状測定装置による3次元像と(b)テラヘルツ位相干渉計による3次元像

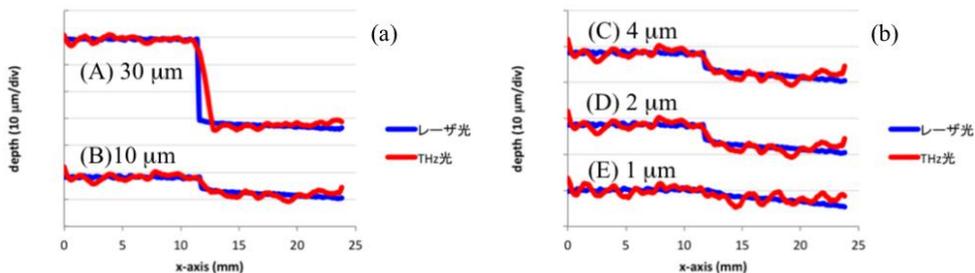


図4 レーザ表面形状測定装置とテラヘルツ位相干渉計による高さ方向の測定結果、
(a) ザグリ深さ10~30 μm , (b) 1~4 μm